

Emisiones de gases de efecto invernadero en los sectores agropecuario y forestal del Uruguay y oportunidades en el mercado de carbono*

W. E. Baethgen^{1} y D. L. Martino²**

¹International Fertilizer Development Center. ²Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, Uruguay.

Greenhouse gas emissions in the agricultural and forestry sectors of Uruguay and opportunities in the carbon market

ABSTRACT: Fossil fuel combustion and changes in the land use (including deforestation) has resulted in an annual rate of carbon dioxide (CO₂) accumulation in the atmosphere of 3,500 million metric tones. The accumulation of CO₂ and other greenhouse gases is expected to cause observable climatic changes in the 21st century. The International Panel on Climate Change (IPCC) has been publishing assessment reports to governments since the early 1990's. The newest report to be published in 2001 concludes that the global temperature in the 20th century has increased $0.6 \pm 0.2^{\circ}\text{C}$, and that the globally averaged surface temperature is projected to warm 1.4°C to 5.8°C by 2100 relative to 1990. The report also includes observational evidence indicating that raises in regional temperatures have already affected several biological systems around the world. Even though it is still difficult to determine how much of the global warming can be attributed to human activity, there is overwhelming agreement that measures should be taken to reverse the current trend of increased accumulation of greenhouse gases (GHG) in the atmosphere. There are basically two paths to reverse such trend: (a) reducing GHG emissions through cleaner energy generation, and (b) removing CO₂ through carbon "sinks" or carbon sequestration. Regarding the option of removing CO₂ from the atmosphere, IPCC has estimated that agricultural lands have the potential for removing 40,000 - 80,000 million metric tones of carbon over the next 50 to 100 years. Thus, soil carbon sequestration in agricultural lands alone might offset the effects of fossil fuel emissions and land use changes for 10-20 years or longer. Additional carbon can be sequestered in well-managed forests and grassland soils. The present article describes the current situation in the agricultural and forestry sectors of Uruguay with respect to greenhouse gas emissions and discusses the possibility of trading carbon certificates if a carbon trading market is established.

Key words: Greenhouse gas, agriculture, forestry, carbon sequestration, carbon market.

©2001 ALPA. Todos los derechos reservados

Arch. Latinoam. Prod. Anim. 2001. 9(2): 127-134

RESUMEN: El rápido y constante incremento de la quema de combustibles fósiles, el aumento de la deforestación y la expansión de las áreas cultivadas han resultado en cambios importantes en la composición de la atmósfera. La concentración atmosférica de gases de efecto invernadero ha venido incrementando continuamente desde la década del 1750 en que comenzó la era industrial. Investigaciones recientes han concluido que los gases de efecto invernadero (GEI) se encuentran en la actualidad en concentraciones más altas que en los últimos 160,000 años. Entre otros efectos, este cambio en la composición de la atmósfera ha resultado en un efecto invernadero intensificado, alterando el equilibrio natural que existía entre la energía solar entrante y la energía terrestre saliente, y resultando en el aumento de la temperatura global de la Tierra. En los últimos años un gran número de países ha comenzado a publicar inventarios nacionales de emisiones de GEIs, utilizando metodologías aprobadas por el IPCC. Esta nueva información disponible para la comunidad internacional ha permitido evaluar la situación actual y a cuantificar la incidencia de los diferentes países sobre las emisiones totales. Una de las consecuencias de esta información ha sido el Protocolo de Kioto, que introduce dos nuevos e importantes elementos: por un lado se definen límites para las emisiones futuras de un grupo de países, y por otro lado define una serie de mecanismos tendientes a la

*Conferencia presentada en la XVI Reunión de ALPA en Montevideo, Uruguay Marzo de 2000

*E-mail: baethgen@undp.org.uy

Recibido Junio 16, 2001.

Aceptado Julio 10, 2001

reducción de las emisiones netas globales incluyendo la creación de un mercado del carbono. En el presente artículo se presentan los resultados del inventario nacional de emisiones de GEIs haciendo especial énfasis en las provenientes de los sectores agropecuario y forestal. El artículo también discute la situación actual en relación al mercado de carbono, y plantea algunas de las oportunidades que existen para Uruguay en dicho mercado.

Palabras clave: Gases de efecto invernadero, agricultura, forestación, secuestro de carbono, mercado de carbono

Introducción

En los últimos 10 000 años, que corresponde al presente período interglaciar, el clima de la Tierra ha permanecido relativamente estable. A lo largo de dicho período, las sociedades modernas han venido evolucionando y en muchos casos han logrado adaptarse a las condiciones climáticas locales y a su variabilidad natural. En la actualidad sin embargo, la sociedad enfrenta cambios potencialmente mucho más rápidos en las condiciones climáticas futuras debido a actividades humanas que afectan tanto la composición de la atmósfera como el balance de la radiación solar.

La mayor parte de la energía solar que recibe la Tierra se absorbe y se convierte en calor. A su vez, una parte de ese calor es irradiada desde la superficie terrestre hacia la atmósfera. En la atmósfera existen gases que tienen la capacidad de absorber calor (vapor de agua, dióxido de carbono, óxido nitroso, metano, ozono). De esta manera parte del calor que la Tierra transmite desde su superficie queda retenido en la atmósfera y resulta en un calentamiento de la propia atmósfera y de la superficie terrestre. Este mecanismo es el que se denomina efecto invernadero natural, sin el cual la temperatura de la Tierra sería aproximadamente 33°C más baja que la actual.

El rápido y constante incremento de la quema de combustibles fósiles, el aumento de la deforestación y la expansión de las áreas cultivadas han resultado en cambios importantes en la composición de la atmósfera. La concentración atmosférica de gases de efecto invernadero ha venido incrementando continuamente desde la década del 1750 en que comenzó la era industrial. El dióxido de Carbono (CO₂) ha aumentado más del 30%, el metano (CH₄) más del 100%, y el óxido nitroso (N₂O) en un 15%. Analizando muestras de hielo extraídas de los casquetes polares, los científicos han logrado estudiar la composición de la atmósfera y las condiciones climáticas del planeta de las últimas decenas de miles de años. Las investigaciones han concluido que los gases de efecto invernadero se encuentran en la actualidad en concentraciones más altas que en los últimos 160,000 años (IPCC, 1996).

Entre otros efectos, este cambio en la composición de la atmósfera ha resultado en un efecto invernadero intensificado, alterando el equilibrio natural que existía entre la energía solar entrante y la energía terrestre saliente, y resultando en el aumento de la temperatura global de la Tierra. La comunidad científica internacional ha venido dedicando muchos esfuerzos al estudio de estos cambios, y a especular sobre los impactos que los mismos pueden tener sobre el pla-

meta. Estudios conducidos por el IPCC (1995) han permitido concluir que la temperatura global del aire ha incrementado entre 0.3 y 0.6°C desde fines del siglo XIX. Por otro lado, utilizando modelos climáticos que consideran las concentraciones de los gases de efecto invernadero y de los aerosoles, se ha estimado que la temperatura global de la superficie de la Tierra podría aumentar entre 1 y 3.5°C para el año 2100. Este rango en las proyecciones se basa en estudios realizados por el IPCC y otras instituciones científicas, considerando tanto las variaciones en la sensibilidad del clima a los gases de invernadero como las estimaciones de emisiones de dichos gases proyectadas para el futuro. Dichas variaciones proyectadas en la temperatura promedio global significarían un cambio climático más rápido que cualquier otro experimentado desde la última era glacial (10,000 años atrás).

A su vez estas variaciones climáticas presentarían impactos importantes sobre el planeta. Algunos de los cambios más corrientemente citados como posibles incluyen: alteraciones en las zonas actuales de vegetación, cambios en la cantidad y distribución de las precipitaciones, derretimiento de glaciares, aumento en el nivel del mar, inundaciones de las zonas costeras, etc.

El agropecuario es uno de los sectores en los que se esperan mayores impactos del cambio climático. Las proyecciones realizadas por la comunidad científica de diferentes partes del mundo indican que la productividad agropecuaria disminuiría en algunas regiones y aumentaría en otras. La mayoría de dichos estudios coinciden en que los impactos más negativos se verían en las zonas tropicales y subtropicales (Reilly *et al.*, 1996). Estos resultados son de una gran importancia ya que justamente en esas regiones se encuentran algunos de los ecosistemas más frágiles del planeta. Por otro lado en estas mismas regiones se encuentra la mayor parte de los países menos desarrollados, y por lo tanto más vulnerables a efectos negativos sobre su sector productivo.

Los estudios de este tipo conducidos en Uruguay indican que la productividad de los cultivos de invierno se vería reducida en un 20-30% bajo escenarios de cambio climático proyectados por modelos de circulación general (Baethgen, 1994; Baethgen y Magrin, 1995). Trabajos más recientes ejecutados como parte del Programa de Estudios de Países (US Country Studies) sugieren que los rendimientos de cultivos de verano también se verían afectados negativamente por un aumento en la temperatura (J. Sawchik, no publicado).

La comunidad internacional también ha reaccionado a estos cambios mediante la creación de programas y conven-

ciones para unificar criterios de investigación, y adoptar medidas para enfrentar posibles cambios globales. Una de las iniciativas más importantes fue la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC). Otro resultado de esta acción coordinada internacional ha sido el establecimiento del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC), que está constituido por científicos de diferentes países, y cuyo cometido fundamental es el actualizar la información científica sobre cambio climático y asesorar a los gobiernos en este tema.

Un paso necesario para la definición de medidas adecuadas para controlar las emisiones de GEIs es el poder contar con información actualizada sobre la situación actual en los diferentes países en relación a dichas emisiones. Por esta razón la UNFCCC estableció que todos los países firmantes de la convención deben elaborar y actualizar inventarios nacionales de las emisiones antropogénicas (fuentes) y de la absorción (sumideros) de los GEIs utilizando metodologías comparables.

En los últimos años un gran número de países han comenzado a publicar sus inventarios nacionales de emisiones de GEIs, utilizando metodologías aprobadas por el IPCC (IPCC/UNEP/OECD/IEA, 1997). Esta nueva información disponible para la comunidad internacional ha permitido evaluar la situación actual y a cuantificar la incidencia de los diferentes países sobre las emisiones totales. Una de las consecuencias de esta información ha sido el Protocolo de Kioto, que introduce dos nuevos e importantes elementos: por un lado se definen límites para las emisiones futuras de un grupo de países, y por otro lado define una serie de mecanismos tendientes a la reducción de las emisiones netas globales incluyendo la creación de un mercado del carbono.

En el presente artículo se presentan los resultados del inventario nacional de emisiones de GEIs haciendo especial énfasis en las provenientes de los sectores agropecuario y forestal. El artículo también discute la situación actual en relación al mercado de carbono, y plantea algunas de las oportunidades que existen para Uruguay en dicho mercado.

Emisiones de Gases con Efecto Invernadero en el Sector Agropecuario del Uruguay

En esta sección se comentarán los resultados de los inventarios nacionales de emisiones de tres GEIs (dióxido de carbono, metano y óxido nitroso), enfatizando especialmente las actividades concernientes a los sectores agropecuario y forestal. Se incluyen también comentarios generales acerca de las fuentes y mecanismos involucrados en cada uno de estos tres GEIs en dichos sectores

Dióxido de carbono (CO₂). El CO₂ es el gas con mayor contribución relativa al efecto invernadero intensificado: 65% según estimaciones del IPCC (1996). La principal fuente de emisiones de CO₂ proviene del uso de combustibles fósiles (carbón, petróleo, gas natural) para producir energía que a su vez se utiliza para transporte, calor, y gene-

ración de electricidad. El IPCC (1996) estima que el 80 a 85% del CO₂ emitido globalmente a la atmósfera proviene de esta fuente.

La otra fuente importante de incremento de CO₂ emitido proviene de los cambios en el uso de la tierra, fundamentalmente la deforestación, es decir el corte y quema de bosques. Existen diferentes casos de deforestación. Los casos en los que el corte y la quema se realizan para limpiar áreas de bosques y convertirlas a tierras cultivadas, en general resultan en balances negativos. Es decir que es mayor la emisión de CO₂ al cultivar la tierra que lo que se fija en los cultivos y los suelos. Otro caso que generalmente resulta en emisiones netas de CO₂, son aquellos en que el bosque se explota para cosechar maderas de alto valor. En ese proceso se cortan y queman las especies menos valiosas para lograr cosechar las más valiosas, y no se maneja el rebrote del bosque secundario que crece al abandonar el sitio de explotación. El IPCC (1996) estima que entre el 15 y el 20% del CO₂ emitido a la atmósfera proviene del resultado de estos cambios en el uso de la tierra.

Es importante señalar que no todos los cambios en el uso de la tierra son negativos desde el punto de vista de emisiones de CO₂. Algunos ejemplos de casos de cambios en el uso de la tierra que típicamente resultan en fijación neta de CO₂ (es decir que la cantidad de carbono que se fija o sequestra es mayor que las emisiones de CO₂) son:

- a. la conversión de pasturas naturales poco productivas a bosques bien manejados
- b. la conversión de pasturas naturales poco productivas a pasturas mejoradas (incluyendo especies más productivas y/o adecuadamente fertilizadas)
- c. algunos casos de crecimiento secundario de bosques naturales, que cuando están bien manejados, pueden igualar o superar la fijación de CO₂ con respecto al bosque nativo original.

Un aspecto adicional pero fundamental a considerar en estos casos es el efecto que estas actividades pueden tener sobre la biodiversidad de los ambientes naturales. Es decir que si bien desde el punto de vista de las emisiones de CO₂ estas situaciones pueden ser favorables, en algunos casos pueden resultar en la pérdida irreversible de especies nativas.

Considerando exclusivamente las emisiones de CO₂ lo que en realidad interesa considerar son los balances netos de carbono. Desde este punto de vista, un buen sistema agropecuario o forestal es aquél que sequestra más carbono (como CO₂) del que emite. Además de las mencionadas anteriormente, otra situación con excelente potencial para alcanzar balances positivos de CO₂ en el sector agropecuario es la siembra directa (sin labranza). Esta técnica de labranza permite acumular hasta 1 Ton de carbono por ha y por año cuando se utiliza en suelos que han perdido cantidades importantes de materia orgánica (Martino y van Hoff, 1999).

En el Cuadro 1 se presentan los resultados generales del inventario nacional para todos los sectores de Uruguay, calculado para los años 1990 y 1994 (MVOTMA, 1997). Los

Cuadro 1. Resultados del inventario de gases con efecto invernadero para Uruguay en 1990 y 1994 para todos los sectores, expresado en Gg (miles de toneladas) de gas.

Categorías de Fuentes y Sumideros	CO ₂		CH ₄		N ₂ O	
	1990	1994	1990	1994	1990	1994
Energía	3 608	3 930	0.71	0.70	0.06	0.08
Procesos Industriales	230	279	-	-	-	-
Agricultura	-	-	612	678	31.5	32.4
Cambio en el Uso de la Tierra y Forestación	1 972	-865				
Desechos	-	-	51.8	58.1	0.22	0.22
Totales Netos	5 810	3 344	665	737	31.8	32.7
Variación 1994-1990 (%)		-42%		+11%		+3%

Fuente: MVOTMA, 1997, MVOTMA, 1998.

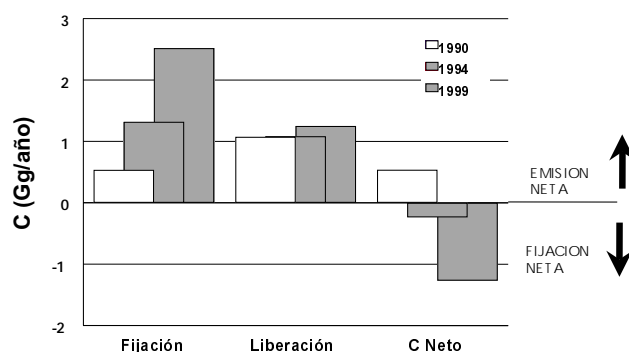


Figura 1. Balance de C en el Sector Forestal en 1990, 1994 y 1999 (Valores de 1999 Estimados).

resultados evidencian la enorme importancia relativa del CO₂ que constituye más del 80% del total de gases emitidos. El sector con mayor contribución a las emisiones de CO₂ en Uruguay es el de Energía fundamentalmente por utilización de combustibles fósiles. El inventario reveló que el 60% de las emisiones de CO₂ en el sector energía provenía del transporte, y el 14% del uso de combustibles fósiles en la agricultura y la pesca (MVOTMA, 1997).

El Cuadro 1 también muestra que el otro sector importante desde el punto de vista de emisiones de CO₂ es el de “cambio en el uso de la tierra y forestal”. Es de destacar el importante cambio que existió en este sector entre 1990 y 1994. El factor más importante determinante de este cambio fue el aumento del área forestada. En 1989 en Uruguay se comenzó a aplicar una ley de prioridad forestal, en la que se implementaron mecanismos para estimular la plantación de bosques en algunos tipos de suelos. El inventario de 1990 no refleja aún ningún impacto de dicha ley en el área total forestada en el país. Sin embargo, en 1994 ya el área forestada había crecido en forma muy importante y el sector “forestación” se había vuelto un fijador neto. La gran canti-

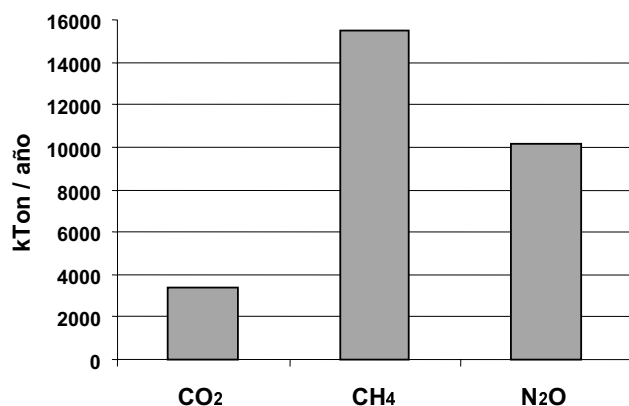
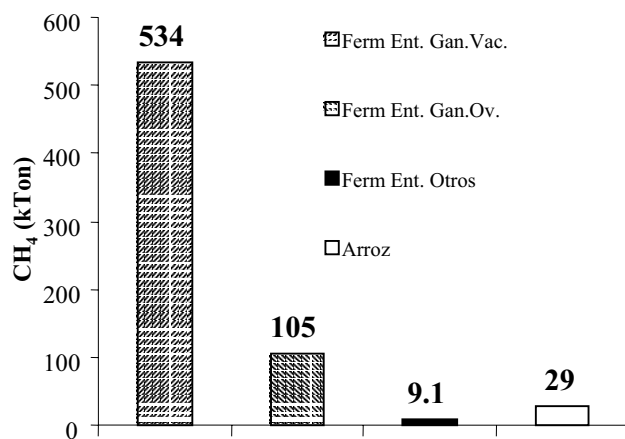
dad de nuevos bosques en crecimiento hacía que las cantidades de carbono que estaban siendo secuestradas en dicho crecimiento superaban claramente las emisiones. El impacto de la ley de prioridad forestal en el país continuó a lo largo de los últimos años, y el área forestada aumentó constantemente alcanzando en la actualidad valores cercanos a las 500.000 ha. Es así que los datos estimados para 1999 indican que el sector forestal se convirtió en un importante fijador neto de CO₂ (Figura 1).

El IPCC ha venido revisando permanentemente la metodología para el cálculo de inventario de emisiones de GEIs. Una de las modificaciones más recientes incluye la consideración de cambios en el uso de la tierra además de la forestación, que determinan emisiones/fijaciones netas de CO₂. Los valores de emisiones y secuestro de carbono para el Uruguay con esta nueva metodología han resultado en una situación claramente diferente. En especial por lo referente al aumento del área bajo pasturas mejoradas. La nueva metodología de estimación de balances indica que es necesario considerar los cambios en el uso de la tierra en los últimos 20 años. Los resultados de la aplicación de esta nueva metodología aparecen en el Cuadro 2. Estas nuevas cifras indican que los cambios en el uso de la tierra ocurridos en Uruguay en el período 1970-1994 resultaron en una fijación neta importante de CO₂. En especial, el gran aumento del área de pasturas mejoradas que se triplicó en este período, resultaron en valores de fijación neta de CO₂ superiores al total de emisiones netas de este gas en el país. Las emisiones netas del inventario nacional de 1994 eran de 3344 kTon de CO₂ por año, y la cantidad de CO₂ secuestrada por cambios en el uso de la tierra fue de 3808 kTon.

Metano (CH₄). El metano (CH₄) es el segundo gas en importancia en relación al efecto invernadero, con una contribución relativa estimada en 20% (IPCC, 1996). La concentración de metano en la atmósfera en los últimos dos siglos ha aumentado en más de 140% (IPCC, 1996), y la comunidad científica estima que este gran aumento ha sido

Cuadro 2. Balance de carbono en Uruguay (expresado como carbono y como CO₂) con la nueva metodología del IPCC.

Uso de la Tierra	Área en 1970 (Miles de ha)	Área en 1994 (Miles de ha)	Cambio Neto 1994 – 1970 (kTon C/año)
Pasturas mejoradas fertilizadas y/o sembradas	474	559	+428
Pasturas anuales	316	234	-415
Praderas artificiales	356	1 043	+3 467
Campo natural	12 800	12 634	-761
Cultivos anuales con labranza convencional	1 137	613	-1 681
Total Cambio Neto C		(kTon C/año)	+1 039
Total Emisiones (-) o Fijación (+)	Netas de CO ₂	(kTon CO ₂ /año)	+3 808

Figura 2. Emisiones Netas de Gases de Efecto Invernadero en Uruguay para 1994 Corregido por Potencial de Calentamiento Global a 100 años (en kTon de CO₂ Equivalente/Año).Figura 3. Inventario de GEIs para Uruguay en 1994: Emisiones de CH₄ del sector agropecuario (adaptado de MVOTMA, 1998).

fundamentalmente causado por la actividad humana. Las fuentes de emisión de este gas más importantes en el mundo son la descomposición de basura, los sistemas energéticos basados en petróleo y gas natural, la actividad agropecuaria (fermentación entérica y producción de arroz), las minas de carbón, el tratamiento de aguas residuales y algunos procesos industriales (US EPA, 2000).

La contribución del CH₄ al efecto invernadero a escala global es muy alta debido al mayor potencial de calentamiento que caracteriza a este gas. En efecto, los gases de efecto invernadero presentan una diferente capacidad de atrapar calor en la atmósfera. Por esta razón el IPCC (1994) ha definido el concepto de Potencial de Calentamiento Global (PCG) de diferentes gases, tomando como referencia al CO₂. Se ha estimado que el CH₄ es 21 veces más efectivo que el CO₂ en atrapar calor (el PCG del metano es 21). El valor de PCG estimado para el óxido nítrico (N₂O) es de 310. Si bien los valores de PCG son discutibles, los valores de emisiones de GEIs en Uruguay corregidos por su PCG, indican que los gases con mayor contribución al efecto invernadero en el país son el CH₄ y el N₂O (Figura 2). En forma conjunta estos dos gases son responsables por casi el 90% del potencial de calentamiento global en el país. Por otro lado, el Cuadro 1 indicaba que el 91% de las emisiones de CH₄, y el 99% de las de N₂O provienen del sector agropecuario.

Las principales fuentes de emisiones de metano en Uruguay son el sector agropecuario (90% del total) y la descomposición de basuras (10% del total). La fermentación entérica de los rumiantes es responsable del 95% del total de metano emitido en el sector agropecuario (Figura 3). La gran incidencia de la producción animal en las emisiones de metano se debe en parte a la altísima relación existente entre el número de animales vacunos y ovinos, y la población humana que existe en el Uruguay (aproximadamente 3:1 para bovinos, y 6:1 para ovinos).

El metano se produce normalmente durante el proceso digestivo de los animales. La cantidad de metano producida y excretada depende fundamentalmente de dos factores: el tipo de animal, y el tipo de dieta a la que los animales están

sujetos. El tipo de sistema digestivo es el factor más determinante de las cantidades de metano producidas y emitidas. Los rumiantes (ganado vacuno, ganado ovino) son los que producen mayores cantidades debido a la fermentación entérica que tiene lugar en el rumen durante la digestión. Por otro lado los animales de mayor tamaño y/o mayor edad tienden a producir mayores cantidades de metano. El tipo de alimento que los animales consumen es el otro factor determinante de las cantidades de metano emitido: cuanto menos digestible es el alimento más metano se produce (Crutzen *et al.*, 1986).

La producción moderna de carne está orientada a aumentar los índices de extracción, es decir a aumentar la cantidad de carne que se produce por unidad de área y de tiempo. Para lograr este objetivo es necesario que los animales puedan ganar suficiente peso en cortos períodos, y a su vez esto se logra con categorías de animales jóvenes que ingieran alimentos de alta digestibilidad (pasturas mejoradas, y en algunos casos suplementos como raciones, silos, etc.). Pero al mismo tiempo, una reducción de la edad promedio del ganado de carne y un aumento de la digestibilidad de la dieta que consumen redundaría en una inmediata reducción de las emisiones de metano. Watson (1996) ha estimado que solamente mejorando la dieta de los rumiantes en el mundo se podría reducir la emisión anual de metano en unos 27 millones de toneladas por año.

Otra vía de emisión de CH_4 en la producción pecuaria es la asociada al manejo del estiércol que en general es menos importante y se limita a los sistemas de producción confinados (tipo "feed-lot"), o a los sistemas en que el estiércol se maneja en estado líquido. Estas dos últimas situaciones son prácticamente inexistentes en el Uruguay.

La otra fuente importante de producción de metano en la agricultura es el cultivo de arroz regado por inundación. El IPCC (1995) ha estimado que las emisiones de metano de campos de arroz inundado son responsables por un 5 a 30% de las emisiones totales de dicho gas en el mundo. En Uruguay, las emisiones de metano provenientes de la producción de arroz ha variado entre el 4 y el 10% de las totales provenientes del sector agropecuario (MVOTMA, 1997; MVOTMA 1998).

El metano en campos de arroz es originado fundamentalmente por la descomposición anaeróbica (en ausencia de oxígeno) de materia orgánica llevada a cabo por microorganismos del suelo. El metano generado de esta manera es liberado a la atmósfera por tres vías principales: (a) por burbujeo en el agua de inundación; (b) por difusión desde la superficie del agua de riego; y (c) por difusión a través de los tejidos de las plantas de arroz durante la estación de crecimiento. Esta última vía es la más importante y generalmente se estima que un 90% del metano producido en cultivos de arroz se libera a la atmósfera a través del aerénquima de las plantas. Esto hace que las emisiones varíen mucho a lo largo de la estación de crecimiento del cultivo dependiendo del estado fenológico, y de las tasas de fotosíntesis y respiración (IRRI, 1994).

La cantidad de metano producida en campos de arroz es afectada por diversos factores. El más importante es el potencial redox (o concentración de oxígeno del medio). Cuando se inunda un campo de arroz para irrigar, el medio ambiente en el suelo que es normalmente oxidante se va convirtiendo en reductor (el agua va desplazando al aire de los poros del suelo y la concentración de oxígeno disminuye). En estas condiciones los microorganismos metanogénicos descomponen materiales orgánicos y producen metano. Por ser un proceso biológico otro factor que afecta la producción de metano en campos de arroz es la temperatura. A mayor temperatura, mayor actividad biológica y mayor producción de metano hasta un máximo de unos 40°C.

Óxido nitroso (N_2O). El otro gas de efecto invernadero producido en cantidades considerables en la actividad agropecuaria es el óxido nitroso (su contribución relativa al efecto invernadero ha sido estimada en 5%, IPCC, 1996). Se estima que un 70% del total de emisiones de N_2O en el mundo provienen de los suelos de regiones agropecuarias (IPCC, 1995). En el caso del Uruguay, el sector agropecuario fue responsable por el 99% del total de las emisiones de óxido nitroso (Cuadro 1).

El N_2O se produce naturalmente en el suelo por dos procesos biológicos: la denitrificación y la nitrificación. En la denitrificación microorganismos del suelo utilizan al nitrato (ante la falta de oxígeno) como aceptor final de electrones en el proceso respiratorio. El nitrato es reducido y uno de los productos intermedios del proceso que puede ser liberado a la atmósfera es el N_2O . Por otro lado, más recientemente se ha descubierto que en el proceso de nitrificación (oxidación del ion NH_4 a NO_3) también se produce N_2O (Byrnes *et al.*, 1990).

Muchas de las prácticas de manejo de suelos comúnmente utilizadas en la agricultura contribuyen a las emisiones de N_2O . Por ejemplo, los fertilizantes orgánicos y sintéticos aumentan las cantidades de nitrógeno aplicadas a los suelos y por lo tanto pueden aumentar las emisiones de N_2O . Otras prácticas agronómicas como el laboreo, la irrigación, la incorporación de residuos de pasturas con leguminosas también afectan los flujos de gases desde y hacia el suelo. Sin embargo, los resultados de investigación aún no permiten la consideración de dichas prácticas de manejo en la elaboración de inventarios de GEIs. Por esta razón en la actualidad los inventarios solamente incluyen las emisiones de N_2O relacionadas con las aplicaciones de nitrógeno al suelo de diferentes fuentes.

Los resultados del inventario nacional de Uruguay indicaron que también para este gas la actividad pecuaria es la que contribuye en mayor medida a las emisiones, y significan un 65% de las emisiones directas de N_2O (Figura 4). Como dato significativo el inventario reveló que las pérdidas totales de N como óxido nitroso (21400 ton N/año) son muy similares a la cantidad total de N que el país importa y utiliza en los fertilizantes.

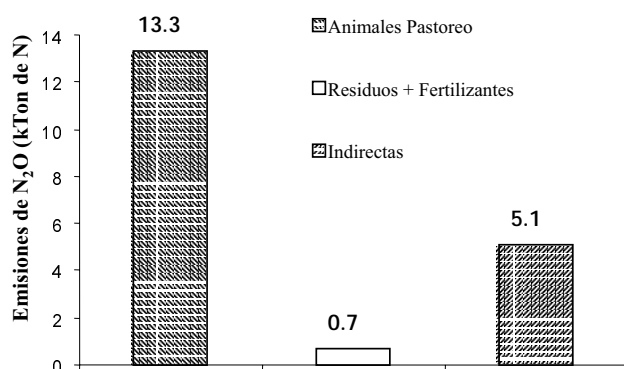


Figura 4. Inventario de GEI's para Uruguay en 1994: Emisiones de N₂O del Sector Agropecuario (valores expresados en miles de Ton de Nitrógeno).

El Mercado del Carbono y las Oportunidades Comerciales para Uruguay

La eventual ocurrencia de un cambio climático causado por las actividades humanas, con posibles impactos negativos, ha determinado una generalizada aceptación de que la atmósfera tiene una limitada capacidad para el almacenaje de los gases con efecto invernadero. Esto inmediatamente conduce a la asignación de un valor económico al escaso espacio que puede ser ocupado por estos gases. El volumen o la cantidad de esos espacios, así como la regulación de los derechos de su propiedad y utilización aún deberán ser definidos.

El Protocolo de Kioto, que establece una reducción de 5,2% en las emisiones de GEIs de los países industrializados entre 1990 y 2008-2012, sentaría las bases para el establecimiento de un sistema internacional de comercio de permisos de emisión. Sin embargo, las posiciones encontradas entre grupos de países manifestadas en los foros diplomáticos hacen pensar que el Protocolo de Kioto no va a ser finalmente ratificado, a menos que el mismo sea reformulado atendiendo a ciertos reclamos de algunas de las partes.

El mercado del carbono parece estar siendo delineado no por un acuerdo internacional multilateral como el de Kioto, sino por la acción de diversos agentes individuales que marcan el camino a través de sus iniciativas. La existencia del mercado se cimenta en la fijación de topes a las emisiones de GEI. Estos topes están siendo fijados voluntariamente por algunos países (Dinamarca, Australia y Reino Unido entre otros) que entienden deben cumplir con sus obligaciones estipuladas por la Convención de Cambio Climático. Por otra parte, diversas empresas (BP Amoco, Royal Dutch Shell, Gemco Canada, entre otras) motivadas por la necesidad de presentar ante sus clientes una imagen de preocupación por el cuidado del ambiente, también están decidiendo

voluntariamente disminuir sus emisiones de GEIs. Otras empresas simplemente actúan porque especulan con que es ventajoso adquirir rápidamente experiencia en un mercado que se desarrollará inexorablemente en el futuro cercano.

Los agentes emisores deberán reducir en el futuro las cantidades de GEIs que liberan a la atmósfera. Algunos de estos agentes tendrán ventajas comparativas sobre otros para lograr dichas reducciones. La creación de un mecanismo de mercado permitirá que la reducción de emisiones la realicen principalmente aquellos que lo puedan hacer al menor costo, generando créditos que podrán ser comercializados como permisos de emisión a otros países o empresas que no puedan o no deseen hacerlo. La unidad comercializable que parecería ser la más ampliamente aceptada es la tonelada de carbono como CO₂ o su equivalente en PCG de otros gases. Diversas estimaciones sitúan el precio de la tonelada de carbono entre US\$ 10 y 70, con un precio probable para el año 2010 del orden de US\$ 30/Ton.

Otra forma de generar créditos de carbono comercializables, además de la reducción de emisiones, sería a través del "secuestro" de CO₂ de la atmósfera haciendo uso del proceso biológico de fotosíntesis. El secuestro de C libera espacios ocupados, permitiendo que los mismos puedan ser llenados por agentes emisores de GEIs, quienes podrán comprar los certificados de secuestro de C para respaldar emisiones por encima de sus topes.

Uruguay tiene el potencial para generar certificados de carbono por cientos de millones de dólares anuales a través de varios mecanismos (Martino y van Hoff 1999). A continuación describimos brevemente los tres principales.

Forestación. La plantación de bosques con especies de rápido crecimiento aparece como la oportunidad más inmediata y cuantitativamente más importante. La capacidad de secuestro de carbono es del orden de 5 a 7 ton C/ha/año en la madera, y de 1-2 ton C/ha/año en el suelo.

En el área actualmente forestada, la remoción de carbono del aire es de cerca de 3 millones de toneladas anuales, cifra que podría multiplicarse por un factor de 3 ó 4 si se lograra el aprovechamiento de las áreas que han sido declaradas de prioridad forestal y que aún no han sido plantadas. Asumiendo un precio de mercado de US\$ 25/t C, el país podría estar generando divisas por más de US\$ 200 millones al año por la venta de certificados. Ello sería en adición a la comercialización de los productos de la madera a ser obtenidos.

Sin perjuicio de ello, es necesario tomar en consideración que a dicha cifra deberá deducirse la cantidad de carbono que sea retornado a la atmósfera por la eventual descomposición de los productos obtenidos. Aún no está claro cómo se va a contabilizar este proceso.

Cambios en el uso de la tierra. La siembra directa es una técnica de producción agrícola que, cuando se establece sobre suelos que han perdido importantes cantidades de materia orgánica, permite acumular carbono a tasas de hasta más de 1 t C/ha/año. Por otra parte, la siembra directa reduce la erosión de los suelos -un importante proceso de libera-

ción de CO₂ a la atmósfera- y el uso de combustibles fósiles. Es posible esperar que en las áreas en que la misma se practique se podría acumular el equivalente a 2 t C/ha/año, considerando la reducción de emisiones y la formación de materia orgánica. Sobre un total de un millón de hectáreas, el país podría recaudar unos US\$ 50 millones por año, además de mejorar notoriamente la calidad de los suelos. Cabe acotar que la capacidad de acumulación de materia orgánica en los suelos no es ilimitada, por lo que se trataría de un proceso que ocurriría por única vez durante un período de 10 a 20 años.

La implantación de pasturas artificiales en suelos que han sido sometidos a procesos degradativos por actividades agropecuarias es otra forma de secuestrar carbono en los suelos. Como se discutió antes (Cuadro 2) la siembra de 700.000 ha de pasturas artificiales en el período 1970-94 fijó más de tres millones de toneladas de carbono por año que, de haber sido posible su comercialización, hubiera implicado un valor de mercado del orden de US\$ 50-100 millones por año. El área potencial para la instalación de praderas artificiales es del orden de millones de hectáreas.

Reducción de las emisiones de metano y óxido nitroso por los rumiantes. Los productores uruguayos emiten 1 kg CH₄/kg carne y 40 g CH₄/L leche (Methol, 2001). En términos de PCG, esto es equivalente a 5.7 t C/t carne y 0.2 kg C/L leche. Si estos productores tuvieran que pagar por la contaminación que ocasionan, asumiendo un precio de US\$ 25/t C, su ganancia se vería disminuida en US\$ 140 por tonelada de carne producida y en US\$ 0.006 por litro de leche. Y, si además del metano, se considerasen las emisiones de óxido nitroso, esos costos fácilmente se duplicarían.

Si bien las emisiones de metano por unidad de producto han disminuido marcadamente en la última década (María Methol, 2000, artículo en el presente Congreso), los valores son aún muy elevados, particularmente en la ganadería extensiva. Esto constituye una fuerte amenaza para este sector tan importante de la actividad económica del país, ya que ciertos mercados podrían erigir barreras no arancelarias a las exportaciones uruguayas de carne y lana basándose en el alto costo ambiental de estos productos. La reducción de emisiones podría a la vez evitar el surgimiento de estas barreras, y generar un ingreso de divisas adicional.

Una hectárea típica bajo ganadería extensiva emite hoy cerca de 0.5 t C equivalente en forma de metano y óxido nitroso. La supresión del ganado implica que automáticamente se inicie un proceso de acumulación de materia orgánica en el suelo. Si bien se carece de información científica que la cuantifique, una acumulación de 0.5 t C/ha/año parece una razonable estimación. Sumando la reducción de emisión y la fijación de carbono se llega a 1 t C/ha/año, potencialmente comerciable a US\$ 25. Esta cifra es notoriamente superior al ingreso neto que hoy obtienen esos productores.

En síntesis, la reducción de las emisiones de GEIs de la ganadería extensiva constituye una posible fuente de ingresos para este sector, con los beneficios adicionales de aumentar la productividad y mejorar la calidad de los suelos. Una reducción de 20% en las emisiones de GEIs podría generar certificados de carbono por US\$ 150 millones anuales.

Literatura citada

- Baethgen, W. E. and G. O. Magrin. 1995. Assessing the impacts of climate change on winter crop production in Uruguay and Argentina using crop simulation models. IN: C. Rosenzweig et al. (eds.), *Climate Change and Agriculture: Analysis of Potential International Impacts*. American Society of Agronomy Special Publication 59, Madison WI, pp 207-228.
- Baethgen, W. E. 1994. Impacts of climate change on barley in Uruguay: yield changes and analysis of nitrogen management systems. IN: C. Rosenzweig and A. Iglesias (ed.) *Implications of Climate Change for International Agriculture: Crop Modeling Study*. USEPA 230-B-94-003, Washington, D.C.
- Byrnes, B. H., C. B. Christianson, L.S. Holt and E.R. Austin. 1990. Nitrous oxide emissions from the nitrification of nitrogen fertilizers. IN: Bowman, A. F. (ed.) *Soils and the Greenhouse Effect*. John Wiley and sons, Chichester. pp. 489-495.
- Crutzen, P. J., I. Aselmann, and W. Seiler. 1986. Methane production by domestic animals, wild ruminants, and other herbivorous fauna. *Tellus* 38:271-284.
- IPCC. 1994. Radiative forcing of climate change. The 1994 report of the Scientific Assessment Working Group of IPCC: Summary for policy makers. IPCC/WMO.
- IPCC. 1995. Climate change 1995: The science of climate change. Report of the Scientific Assessment Working Group of IPCC: Summary for policy makers and Technical summary of the working group I report. IPCC/WMO.
- IPCC. 1996. Climate Change 1995: The Science of Climate Change, Intergovernmental Panel on Climate Change; J.T. Houghton, L.G. Meira Filho, B.A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg, and K. Maskell, eds.; Cambridge University Press. Cambridge, U.K.
- IPCC/UNEP/OECD/IEA. 1997. Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Paris: Intergovernmental Panel on Climate Change, United Nations Environment Programme, Organization for Economic Co-Operation and Development, International Energy Agency.
- IRRI. 1994. Climate change and rice. International Symposium Abstracts. International Rice Research Institute, Los Baños, Philippines.
- Martino, D. L. y E. van Hoff, 1999. Mercado del Carbono: una Oportunidad para Uruguay. *Uruguay Forestal* 9 (21):4-9 (<http://www.inia.org.uy/agroclima/index.html>).
- MVOTMA. 1997. Inventario nacional de gases de efecto invernadero 1990. 127 pp. Montevideo.
- MVOTMA. 1998. Inventario nacional de emisiones netas de gases de efecto invernadero: 1994, y Estudio comparativo de emisiones netas de gases de efecto invernadero para 1990 y 1994. Montevideo. 363 pp.
- Reilly, J., W. E. Baethgen, F. E. Chege, S. C. van de Geijn, Lin Erda, A. Iglesias, G. Kenny, D. Patterson, J. Rogasik, R. Ritter, C. Rosenzweig, W. Sombroek and J. Westbrook. 1996. *Agriculture in a changing climate: impacts and adaptation*, IN: *Changing Climate: Impacts and Response Strategies*, Report of Working Group II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.